

REC'D 16 FEB 2004

WIPO PCT



PCT/EP03/12754

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:**

102 55 959.7 ✓

**Anmeldetag:**

29. November 2002 ✓

**Anmelder/Inhaber:**

Siemens Aktiengesellschaft, München/DE

**Bezeichnung:**

Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines technischen Systems sowie Computerprogramm-Produkt

**IPC:**

G 05 B 17/00

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 26. November 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**

**Der Präsident**

In Auftrag

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Beschreibung**Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines technischen Systems sowie Computerprogramm-Produkt**

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Entwurf eines technischen Systems sowie ein entsprechendes Computerprogramm-Produkt.

- 10 Bei der Beschreibung eines technischen Systems, beispielsweise einer Kraftwerksanlage, werden verschiedene Parameter, wie z. B. Drücke, Massenflüsse u.s.w. herangezogen. Die Parameter gehorchen bestimmten physikalischen Gesetzen, wie z. B. Massen- oder Energiebilanzen, welche sich durch ein Gleichungssystem ausdrücken lassen. Die Lösungen des Gleichungssystems sind die Zustandsgrößen des technischen Systems. Aus diesen Zustandsgrößen können wiederum für den Betrieb des technischen Systems relevante Diagnosegrößen berechnet werden, wie z. B. der Wirkungsgrad einer Kraftwerksanlage. Der konkrete Zustand eines technischen Systems kann darüber hinaus durch Messungen erfasst werden. Die Messgrößen der Messungen können direkt den Wert einer Zustandsgröße wiedergeben; es können aber auch aus den Zustandsgrößen abgeleitete Messgrößen gemessen werden. Beispielsweise kann die Temperatur eines technischen Systems gemessen werden, während die Zustandsgrößen des Systems die Enthalpie und der Druck sind. Zur Bestimmung der Zustandsgrößen aus den Messgrößen führt man im allgemeinen eine Messung durch und sucht die Zustandsgrößen, welche das Gleichungssystem lösen und deren abgeleiteten Messgrößen
- 15
- 20
- 30 möglichst nahe bei den durch die Messung ermittelten Messwerten liegen. Hierzu gibt es standardisierte Verfahren (siehe z.B. VDI-Richtlinie 2048).

- 35 Es kann das Problem auftreten, dass aufgrund einer zu geringen Anzahl von Gleichungen im Gleichungssystem bzw. einer zu geringen Anzahl von Messstellen einzelne Zustandsgrößen oder einzelne Diagnosegrößen unbestimmt bleiben. Ferner können

aufgrund von Messfehlern die Zustandsgrößen bzw. die Diagnosengrößen mit großen Unsicherheiten behaftet. Es muss deshalb entschieden werden, durch welche Messungen die Genauigkeit bestimmter Zustandsgrößen verbessert werden kann bzw. bestimmte Zustandsgrößen überhaupt erst bestimmt werden können. Hierzu wird üblicherweise auf den Rat erfahrener Ingenieure zurückgegriffen, und die Vorschläge dieser Ingenieure lassen sich durch Simulationsprogramme überprüfen. Hierzu sind jedoch zeitaufwendige Auswertungen erforderlich.

Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems anzugeben, bei dem systematisch ermittelt wird, wie die Messungen von einzelnen Messgrößen die Parameter des technischen Systems beeinflussen.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Entwurf eines technischen Systems, das durch Parameter umfassend Zustandsgrößen und von den Zustandsgrößen abhängige Diagnosengrößen charakterisiert ist. Unter Entwurf wird hierbei insbesondere die Analyse und/oder Änderung des technischen Systems verstanden, insbesondere die Analyse und Änderung der im technischen System vorgenommenen Messungen. Das technische System wird dabei durch ein Gleichungssystem beschrieben, wobei die Zustandsgrößen die Lösungen des Gleichungssystems sind. In den Entwurf des technischen Systems wird ein Messpark einbezogen, der erste Messgrößen umfasst, wobei die ersten Messgrößen im technischen System mit einer vorgegebenen Genauigkeit gemessen werden. Ferner sind in dem technischen System zweite, von den Zustandsgrößen abhängige Messgrößen mit einer vorgegebenen Genauigkeit messbar.

In dem erfindungsgemäßen Verfahren werden erste Sensitivitätsgrößen für die ersten Messgrößen und/oder zweite Sensitivitätsgrößen für die zweiten Messgrößen und/oder dritte Sensitivitätsgrößen für die dritten Messgrößen bestimmt.

vitätsgrößen für die zweiten Messgrößen bestimmt, wobei zur Bestimmung der ersten Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße eine Änderung der Genauigkeit der Messung der ersten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst, und zur Bestimmung der zweiten Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße die Messung der zweiten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst. Der Messpark wird daraufhin in Abhängigkeit von den ersten und/oder zweiten Sensitivitätsgrößen derart verändert, dass die Genauigkeit einer oder mehrerer erster Messgrößen verändert wird und/oder eine oder mehrere erste Messgrößen aus dem Messpark herausgenommen werden und/oder eine oder mehrere zweite Messgrößen zum Messpark hinzugenommen werden. Dieser veränderte Messpark wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

In einer bevorzugten Ausführungsform wird vorzugsweise die Genauigkeit einer ersten Messgröße erhöht, wenn die erste Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt, und/oder eine erste Messgröße wird aus dem Messpark herausgenommen, wenn die erste Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt, und/oder eine zweite Messgröße wird zum Messpark hinzugenommen, wenn die zweite Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt. Durch die Wahl von unterschiedlichen Wertebereichen kann somit das Entwurfsverfahren an unterschiedliche benutzerspezifische Anforderungen in einfacher Art und Weise angepasst werden.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist das technische System durch ein Gleichungssystem  $H(x) = (H_1(x) \dots, H_n(x) = 0$  beschrieben, wobei  $x = (x_1, \dots, x_n)$  ein Vektor ist, der als Komponenten die Zustandsgrößen  $x_i$  umfasst. An dieser Stelle sei angemerkt, dass alle im folgenden verwendeten Indizes  $i, j, k$  bzw.  $l$  natürliche Zahlen darstellen.

Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden in einer bevorzugten Ausführungsform insbesondere folgende Matrizen berechnet:

- 5 - eine Matrix  $N$ , die den Nullraum der Jakobimatrix von  $H$  aufspannt,
- eine Matrix  $W$ , so dass  $W^T \cdot W$  die Inverse der Kovarianzmatrix der ersten Messgrößen  $y_i = b_i(x)$  ist, wobei die Kovarianzmatrix als Einträge die Kovarianzen  $\sigma_{ij}^2 = E((y_i - E(y_i))(y_j - E(y_j)))$  aufweist, wobei  $E(y)$  der Erwartungswert von  $y$  ist;
- 10 - eine Matrix  $M$ , welche die pseudoinverse Matrix zu  $A = W \cdot D_b \cdot N$  ist, wobei  $D_b$  die Jakobimatrix der ersten Messgrößen  $y_i = b_i(x)$  ist.

15

Die Begriffe Nullraum, Jakobimatrix sowie inverse bzw. pseudoinverse Matrix sind aus der Theorie der Matrixberechnungen bekannte Definitionen (siehe beispielsweise Gene H. Golub, Charles F. van Loan: „Matrix Computations“, 3rd Edition, Baltimore, London; The Johns Hopkins University Press; 1996).

20

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind die im technischen System berechneten ersten Sensitivitätsgrößen jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung eines ausgewählten Parameters zu der Genauigkeitsänderung einer ersten Messgröße, wobei der ausgewählte Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist. Das Verfahren zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass:

25

30

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- 35 - eine oder mehrere der ersten Sensitivitätsgrößen  $\Phi_{y \times x_1}$  jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung  $\Delta \sigma_{11}^2 / x_1 = \Delta E((x_1 - E(x_1))^2) / x_1$  der ausgewählten Zustandsgröße  $x_1$  zu

der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{jj}^2 / y_j = \Delta E((y_j - E(y_j))^2) / y_j$  einer ersten Messgröße  $y_j$  darstellen;

- die ersten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

5

$$\Phi_{y_j x_l} = \frac{\sigma_{jl}^2}{\sigma_{jj}^2} \cdot r_{lj}^2$$

wobei  $r_{lj}$  das Element in der  $l$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte der Matrix  $N \cdot M \cdot W$  ist.

In einer weiteren Ausführungsform stellen die ersten Sensitivitätsgrößen jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung einer ausgewählten Diagnosegröße zu der Genauigkeitsänderung einer ersten Messgröße dar, wobei die ausgewählte Diagnosegröße über die ersten Messgrößen bestimmbar ist. Das Verfahren zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass:

15

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $Dd$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;
- eine oder mehrere der ersten Sensitivitätsgrößen  $\Phi_{y_j d_n}$  jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{nn}^2 / d_n = \Delta E((d_n - E(d_n))^2) / d_n$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  zu der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{jj}^2 / y_j = \Delta E((y_j - E(y_j))^2) / y_j$  einer ersten Messgröße  $y_j$  darstellen;
- die ersten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

20

$$\Phi_{y_j d_n} = \frac{\sigma_{nj}^2}{\sigma_{nn}^2} \cdot s_{nj}^2$$

30

wobei  $s_{nj}$  das Element in der  $n$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte von  $Dd \cdot N \cdot M \cdot W$  ist.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform stellen eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz einer ausgewählten Zustandsgröße bei der Hinzunahme ei-

35

ner zweiten Messgröße dar, wobei die ausgewählte Zustandsgröße über die ersten Messgrößen bestimmbar ist. Das Verfahren zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass:

- 5 - wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow x_1}^2$  der ausgewählten Zustandsgröße  $x_1$  bei
- 10 Hinzunahme einer zweiten Messgröße, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist, mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellen;
- die zweiten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

15

$$\sigma_{k \rightarrow x_i}^2 = m_i^T \cdot m_i - \frac{(m_k^T \cdot m_i)^2}{\sigma_k^2 + m_k^T \cdot m_k},$$

wobei  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N$  ist.

- 20 In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung stellen eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz einer ausgewählten Diagnosegröße bei Hinzunahme einer zweiten Messgröße dar, wobei die ausgewählte Diagnosegröße über die ersten Messgrößen bestimmbar ist. Das Verfahren zeichnet sich hierbei dadurch aus, dass:

25

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $D_d$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen
- 30  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;
- eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow d_n}^2$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  bei Hinzunahme einer zweiten Messgröße, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist, mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark
- 35 darstellen;

- die zweiten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

$$\sigma_{k \rightarrow d_n}^2 = q_n^T \cdot q_n - \frac{(m_k^T \cdot q_n)^2}{\sigma_k^2 + m_k^T \cdot m_k}$$

5

wobei  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T$  und  $q_n$  die  $n$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T \cdot Dd^T$  ist.

Es kann nunmehr der Fall auftreten, dass der ausgewählte Parameter des technischen Systems eine Zustandsgröße ist, die nicht über die ersten Messgrößen bestimmbar ist. In diesem Falle wird zunächst eine zweite Messgröße ermittelt, deren Wert eine Zustandsgröße ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit der ausgewählte Parameter eindeutig bestimmbar ist. Das Verfahren, bei dem dieser Fall berücksichtigt ist, zeichnet sich dadurch aus, dass:

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die nicht über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $P$ , welche die orthogonale Projektion auf den Nullraum von  $A$  ist, bestimmt wird;
- eine zweite Messgröße ermittelt wird, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit die ausgewählte Zustandsgröße eindeutig bestimmbar ist;
- eine der zweiten Sensitivitätsgrößen die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow x_1}^2$  der ausgewählten Zustandsgröße bei Hinzunahme der ermittelten zweiten Messgröße  $x_k$  mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellt;
- die zweite Sensitivitätsgröße durch folgende Formel bestimmt wird:

$$\sigma_{k \rightarrow x_1}^2 = \sigma_k^2 \cdot \frac{\|P\|^2}{\|p_k\|^2} + \left\| m_l - \frac{\|P\|}{\|p_k\|} m_k \right\|^2,$$



mit  $p = Pn_1$ , wobei  $n_1$  die 1-te Spalte der Matrix  $N^T$  ist und  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T$  ist und  $p_k$  die  $k$ -te Spalte der Matrix  $P \cdot N^T$  ist.

5 Es kann ferner der Fall auftreten, dass der ausgewählte Parameter eine Diagnosegröße ist, die nicht über die erste Messgröße bestimmbar ist. In diesem Fall wird zunächst eine zweite Messgröße ermittelt, deren Wert eine Zustandsgröße ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit die ausgewählte  
10 te Diagnosegröße eindeutig bestimmbar ist. Das Verfahren, bei dem dieser Fall berücksichtigt ist, zeichnet sich dadurch aus, dass:

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die nicht über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $Dd$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;
- eine Matrix  $P$ , welche die orthogonale Projektion auf den Nullraum von  $A$  ist, bestimmt wird;
- eine zweite Messgrößen ermittelt wird, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit die ausgewählte Diagnosegröße eindeutig bestimmbar ist;
- 25 - eine der zweiten Sensitivitätsgrößen die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow d_n}^2$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  bei Hinzunahme der ermittelten zweiten Messgröße  $x_k$  mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellt;
- die zweite Sensitivitätsgröße durch folgende Formel bestimmt wird:

$$\sigma_{k \rightarrow d_n}^2 = \sigma_k^2 \cdot \frac{\|p\|^2}{\|p_k\|^2} + \left\| M^T \cdot c_n - \frac{\|p\|}{\|p_k\|} m_k \right\|^2,$$

mit  $p = Pc_n$ , wobei  $c_n$  die  $n$ -te Spalte der Matrix  $N^T \cdot Dd^T$ ,  $m_k$  die  $k$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T$  ist und  $p_k$  die  $k$ -te  
35 Spalte der Matrix  $P \cdot N^T$  ist.

Bei den beiden zuletzt genannten Ausführungsformen läuft die Ermittlung der zweiten Messgröße vorzugsweise derart ab, dass in der Matrix  $P \cdot N^T$  die Spalte gesucht wird, so dass  $p$  linear abhängig von dem durch diese Spalte dargestellten Vektor ist, wobei der Index der Spalte angibt, welcher zweite Messwert zu dem Messpark hinzuzufügen ist.

In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung werden bei den Ausführungsformen, bei denen als zweite Sensitivitätsgrößen die Varianzen von ausgewählten Parametern bei der Hinzunahme von zweiten Messgrößen bestimmt werden, als Standardabweichung für die zweiten hinzuzunehmenden Messgrößen 1% des Wertes der zweiten Messgröße angenommen.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mathematisch die Richtigkeit aller im vorangegangenen verwendeten Formeln bewiesen werden kann.

Neben dem oben beschriebenen Verfahren betrifft die Erfindung auch eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens. Darüber hinaus umfasst die Erfindung ein Computerprogrammprodukt, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, das auf einem Rechner ablaufbar ist und mit dem das erfindungsgemäße Verfahren durchführbar ist.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen dargestellt und erläutert.

Es zeigt:

Fig.1 den schematischen Aufbau eines technischen Systems, das mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens analysiert wird.

35

Fig. 2 eine Prozessoreinheit zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Das in Fig. 1 gezeigte technische System betrifft ein Heizsystem eines Kraftwerks mit zwei hintereinander geschalteten Heizflächen 1 und 2, wobei an diesen Heizflächen ein Gasstrom G und ein Wasserstrom W in jeweils entgegengesetzten Richtungen vorbeiströmen.

Das technische System wird durch folgende Zustandsgrößen charakterisiert:

10	$m_{W, \text{ein}}$	Massenfluss des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem;
	$m_{W, \text{aus}}$	Massenfluss des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem;
15	$h_{W, \text{ein}}$	spezifische Enthalpie des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem;
20	$h_{W, \text{Mitte}}$	spezifische Enthalpie des Wassers zwischen den beiden Heizflächen 1 und 2;
	$h_{W, \text{aus}}$	spezifische Enthalpie beim Austritt des Wassers aus dem Heizsystem;
25	$m_G$	Massenfluss des Gases im Heizsystem;
	$h_{G, \text{ein}}$	spezifische Enthalpie des Gases beim Eintritt in das Heizsystem;
30	$h_{G, \text{Mitte}}$	spezifische Enthalpie des Gases zwischen den beiden Heizflächen 1 und 2;
35	$h_{G, \text{aus}}$	spezifischen Enthalpie des Gases beim Austritt aus dem Heizsystem.

Die Zustandsgrößen sind Variablen eines Gleichungssystems  $H(x)=0$ , welches folgende physikalischen Bilanzgleichungen umfasst:

5 Massenbilanz des Wassers im Heizsystem:

$$m_{W,ein} - m_{W,aus} = 0 ;$$

Enthalpiebilanz an der ersten Heizfläche:

10

$$m_G \cdot (h_{G,ein} - h_{G,Mitte}) - m_{W,aus} \cdot (h_{W,aus} - h_{W,Mitte}) = 0;$$

Enthalpiebilanz an der zweiten Heizfläche:

$$m_G \cdot (h_{G,Mitte} - h_{G,aus}) - m_{W,ein} \cdot (h_{W,Mitte} - h_{W,ein}) = 0 .$$

15

Es wird folgender Soll-Arbeitspunkt des technischen Systems betrachtet, wobei die nachfolgenden Werte der Zustandsgrößen eine Lösung des obigen Gleichungssystems darstellen:

$m_{W,ein}$	$m_{W,aus}$	$h_{W,ein}$	$h_{W,Mitte}$	$h_{W,aus}$	$m_G$	$h_{G,ein}$	$h_{G,Mitte}$	$h_{G,aus}$
100	100	200	300	400	50	1000	800	600

20

Neben den oben genannten Zustandsgrößen ist das technische System ferner durch einen Diagnosewert charakterisiert, der im vorliegenden Fall den relativen Wärmeübertrag des durchströmenden Gases darstellt. Der Wärmeübertrag  $W$  kann durch folgende Formel beschrieben werden:

25

$$W = \frac{h_{G,ein} - h_{G,aus}}{h_{G,ein}}$$

30

Folgende erste Messgrößen werden in dem technischen System mit einer Standardabweichung von jeweils 1% bezüglich des jeweiligen Soll-Wertes gemessen:

Enthalpiefluss des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem:

$$m_{W, \text{ein}} \cdot h_{W, \text{ein}} ;$$

5 Massenfluss des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem:

$$m_{W, \text{ein}} ;$$

Enthalpiefluss des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem:

10

$$m_{W, \text{aus}} \cdot h_{W, \text{aus}} ;$$

Massenfluss des Gases :

15  $m_G ;$

Enthalpiefluss des Gases beim Eintritt in das Heizsystem:

$$m_G \cdot h_{G, \text{ein}} .$$

20

Mit der oben genannten Formel für den relativen Wärmeübertrag  $W$  ergibt sich mit den Sollwerten  $W = 0,4$ .

25 Aufgrund der verwendeten Standardabweichungen von 1% führt die Messung des relativen Wärmeübertrags zu einem Messwert von 0,4 mit einer Standardabweichung von 0,0098.

30 In einer ersten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens wird als Sensitivitätsgröße eines ersten Messwerts jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung des Diagnosewertes  $W$  zu der Genauigkeitsänderung des ersten Messwertes bestimmt.

Es ergeben sich folgende Werte:

35 Sensitivitätsgröße des Enthalpieflusses des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem: 0,167.

Sensitivitätsgröße des Massenflusses des Wassers beim Eintritt in das Heizsystem: 0,0.

5      Sensitivitätsgröße des Enthalpieflusses des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem: 0,667.

Sensitivitätsgröße des Massenflusses des Gases : 0,0;

10      Sensitivitätsgröße des Enthalpieflusses des Gases beim Eintritt in das Heizsystem: 0,167.

15      Man erkennt, dass die Sensitivitätsgröße des Enthalpieflusses des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem den größten Wert aufweist. Das bedeutet, dass eine Änderung der Genauigkeit der Messung des Enthalpieflusses des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem den größten Einfluss auf die Genauigkeit der Messung des relativen Wärmeübertrags hat. Folglich führt eine Verbesserung der Messgenauigkeit des Enthalpieflusses des Wassers beim Austritt aus dem Heizsystem am wirkungsvollsten zu einer Verbesserung der Genauigkeit des Diagnosewertes. Demgegenüber haben die Messungen der Massenflüsse einen Sensitivitätswert von 0 und deshalb keine Auswirkungen auf die Genauigkeit des Diagnosewertes  $W$ .

30      In einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens werden als Sensitivitätsgrößen die Varianzen des relativen Wärmeübertrags unter der Annahme berechnet, dass im technischen System eine Zustandsgröße zu den ersten Messgrößen als zweite Messgröße mit einer Standardabweichung von 1 % bezüglich des Sollwertes hinzugenommen wird. Im Folgenden sind die Standardabweichungen (Wurzeln aus den Varianzen) bei der Hinzunahme der einzelnen Zustandsgrößen angegeben:

35      Hinzunahme von  $m_{W, \text{ein}}$ : 0,0098;

Hinzunahme von  $m_{W, \text{aus}}$ : 0,0098;

Hinzunahme von  $h_{W, \text{ein}}$ : 0,0095;

Hinzunahme von  $h_{W, \text{aus}}$ : 0,0086;

5 Hinzunahme von  $m_G$ : 0,0098;

Hinzunahme von  $h_{G, \text{ein}}$ : 0,0095;

Hinzunahme von  $h_{G, \text{aus}}$ : 0,0062.

10 Eine Hinzunahme von  $h_{W, \text{Mitte}}$  und  $h_{G, \text{Mitte}}$  wird nicht betrachtet, da diese Zustandsgrößen durch die Messgrößen nicht eindeutig bestimmt sind. Es ist ersichtlich, dass die Einführung der Messung von  $h_{G, \text{aus}}$  die kleinste Standardabweichung für den re-

15 lativen Wärmeübertrag ergibt. Folglich wird die Messung von  $h_{G, \text{aus}}$  zu dem Messpark der ersten Messungen hinzugenommen.

In einer weiteren Ausführungsform der Erfindung werden nunmehr Zustandsgrößen betrachtet, die nicht eindeutig durch die ersten Messgrößen des technischen Systems bestimmt sind. Es

20 handelt sich hierbei um die Zustandsgrößen  $h_{W, \text{Mitte}}$  und  $h_{G, \text{Mitte}}$ . Es wird nunmehr in einem ersten Schritt ermittelt, welche Messgröße hinzugenommen werden muss, damit die Zustandsgrößen  $h_{W, \text{Mitte}}$  und  $h_{G, \text{Mitte}}$  eindeutig bestimmt sind. Hierzu wird eine

25 Rechnung gemäß Anspruch 11 durchgeführt.

Es ergibt sich, dass eine Messung von  $h_{W, \text{Mitte}}$  oder eine Messung von  $h_{G, \text{Mitte}}$  schon jeweils beide Zustandsgrößen  $h_{W, \text{Mitte}}$  und  $h_{G, \text{Mitte}}$  festlegen. Bei der Annahme einer Standardabweichung

30 von 1 % für die Messung von  $h_{W, \text{Mitte}}$  bzw.  $h_{G, \text{Mitte}}$  ergibt sich:

- bei der Messung von  $h_{W, \text{Mitte}}$  eine Standardabweichung für  $h_{W, \text{Mitte}}$  von 3,0 und eine Standardabweichung für  $h_{G, \text{Mitte}}$  von 17,34;

- bei der Messung von  $h_{G,Mitte}$  eine Standardabweichung für  $h_{W,Mitte}$  von 9,06 und eine Standardabweichung von  $h_{G,Mitte}$  8,0.

5 Hieraus ist ersichtlich, dass zur genauen Bestimmung von  $h_{W,Mitte}$  bevorzugt auch  $h_{W,Mitte}$  gemessen wird, wohingegen zu einer genauen Bestimmung von  $h_{G,Mitte}$  bevorzugt auch  $h_{G,Mitte}$  als Messung zum Messpark hinzugenommen wird.

10 Das oben beschriebene Verfahren ermöglicht eine systematische und schnelle Suche nach neuen Mess-Stellen, durch welche die Genauigkeit von ausgewählten Zustandsgrößen bzw. Diagnosegrößen verbessert werden kann. Es muss somit nicht mehr auf die Erfahrung von Ingenieuren zurückgegriffen werden, um zu entscheiden, welche Messgrößen zu einem Messpark hinzugenommen werden sollen bzw. welche Messgenauigkeiten bevorzugt verbessert werden sollten.

20 In Fig. 2 ist eine Prozessoreinheit PRZE zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Die Prozessoreinheit PRZE umfasst einen Prozessor CPU, einen Speicher MEM und eine Input/Output-Schnittstelle IOS, die über ein Interface IFC auf unterschiedliche Art und Weise genutzt wird: Über eine Grafikschnittstelle wird eine Ausgabe auf einem Monitor MON sichtbar und/oder auf einem Drucker PRT ausgegeben. Eine Eingabe erfolgt über eine Maus MAS oder eine Tastatur TAST. Auch verfügt die Prozessoreinheit PRZE über einen Datenbus BUS, der die Verbindung von einem Speicher MEM, dem Prozessor CPU und der Input/Output-Schnittstelle IOS gewährleistet.

30 Weiterhin sind an den Datenbus BUS zusätzliche Komponenten anschließbar, z.B. zusätzlicher Speicher, Datenspeicher (Festplatte) oder Scanner.



Patentansprüche

1. Verfahren zum Entwurf eines technischen Systems, das durch Parameter umfassend Zustandsgrößen und von den Zustandsgrößen abhängige Diagnosegrößen charakterisiert ist:
- bei dem das technische System durch ein Gleichungssystem beschrieben wird, wobei die Zustandsgrößen Lösungen des Gleichungssystems sind;
  - bei dem ein Messpark umfassend erste Messgrößen analysiert wird, wobei die ersten Messgrößen mit vorgegebenen Genauigkeiten im technischen System gemessen werden und von den Zustandsgrößen abhängen;
  - bei dem zweite, von den Zustandsgrößen abhängige Messgrößen im technischen System mit einer vorbestimmten Genauigkeit messbar sind;
  - bei dem erste Sensitivitätsgrößen für die ersten Messgrößen und/oder zweite Sensitivitätsgrößen für die zweiten Messgrößen bestimmt werden;
  - wobei zur Bestimmung der ersten Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße eine Änderung der Genauigkeit der Messung der ersten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst, und zur Bestimmung der zweiten Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße die Messung der zweiten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst;
  - bei dem der Messpark in Abhängigkeit von den ersten und/oder zweiten Sensitivitätsgrößen derart verändert wird, dass die Genauigkeit einer oder mehrerer erster Messgrößen verändert wird und/oder eine oder mehrere

erste Messgrößen aus dem Messpark herausgenommen werden und/oder eine oder mehrere zweite Messgrößen zum Messpark hinzugenommen werden;

- 5        - bei dem der veränderte Messpark zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt wird.
  
2.      Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Genauigkeit einer ersten Messgröße erhöht wird, wenn die erste Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt, und/oder eine erste Messgröße aus dem Messpark herausgenommen wird, wenn die erste Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt, und/oder eine zweite Messgröße zum Messpark hinzugenommen wird, wenn die zweite Sensitivitätsgröße dieser Messgröße in einem vorbestimmten Wertebereich liegt.
  
3.      Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das technische System durch ein Gleichungssystem  $H(x) = (H_1(x), \dots, H_m(x)) = 0$  beschrieben wird, wobei  $x = (x_1, \dots, x_n)$  ein Vektor ist, der als Komponenten die Zustandsgrößen  $x_i$  umfasst.
  
4.      Verfahren nach Anspruch 3, bei dem die folgenden Matrizen berechnet werden:
  - eine Matrix  $N$ , die den Nullraum der Jakobimatrix von  $H$  aufspannt,
  - eine Matrix  $W$ , so dass  $W^T W$  die Inverse der Kovarianzmatrix der ersten Messgrößen  $y_i = b_i(x)$  ist, wobei die Kovarianzmatrix als Einträge die Kovarianzen  $\sigma_{ij}^2 = E((y_i - E(y_i))(y_j - E(y_j)))$  aufweist, wobei  $E(y)$  der Erwartungswert von  $y$  ist;
  - eine Matrix  $M$ , welche die pseudoinverse Matrix zu  $A = W \cdot D b \cdot N$  ist, wobei  $D b$  die Jakobimatrix der ersten Messgrößen  $y_i = b_i(x)$  ist.

## 5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine oder mehrere der ersten Sensitivitätsgrößen  $\Phi_{y_j x_1}$  jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{11}^2/x_1 = \Delta E((x_1 - E(x_1))^2)/x_1$  der ausgewählten Zustandsgröße  $x_1$  zu der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{jj}^2/y_j = \Delta E((y_j - E(y_j))^2)/y_j$  einer ersten Messgröße  $y_j$  darstellen;
- die ersten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

$$\Phi_{y_j x_l} = \frac{\sigma_{jl}^2}{\sigma_{ll}^2} \cdot r_{lj}^2$$

- 15 wobei  $r_{lj}$  das Element in der  $l$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte der Matrix  $N \cdot M \cdot W$  ist.

## 6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, bei dem

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $D_d$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;
- eine oder mehrere der ersten Sensitivitätsgrößen  $\Phi_{y_j d_n}$  jeweils das Verhältnis der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{nn}^2/d_n = \Delta E((d_n - E(d_n))^2)/d_n$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  zu der Genauigkeitsänderung  $\Delta\sigma_{jj}^2/y_j = \Delta E((y_j - E(y_j))^2)/y_j$  einer ersten Messgröße  $y_j$  darstellen;
- die ersten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

$$\Phi_{y_j d_n} = \frac{\sigma_{nj}^2}{\sigma_{nn}^2} \cdot s_{nj}^2$$

wobei  $s_{nj}$  das Element in der  $n$ -ten Zeile und  $j$ -ten Spalte von  $Dd \cdot NM \cdot W$  ist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem

5

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow x_1}^2$  der ausgewählten Zustandsgröße  $x_1$  bei Hinzunahme einer zweiten Messgröße, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist, mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellen;
- die zweiten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

10

15

$$\sigma_{k \rightarrow x_i}^2 = m_i^T \cdot m_i - \frac{(m_k^T \cdot m_i)^2}{\sigma_k^2 + m_k^T \cdot m_k},$$

wobei  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N$  ist.

20 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 7, bei dem

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- eine Matrix  $Dd$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;
- eine oder mehrere der zweiten Sensitivitätsgrößen jeweils die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow d_n}^2$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  bei Hinzunahme einer zweiten Messgröße, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist, mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellen;
- die zweiten Sensitivitätsgrößen durch folgende Formel bestimmt werden:

30

35

$$\sigma_{k \rightarrow d_n}^2 = q_n^T \cdot q_n - \frac{(m_k^T \cdot q_n)^2}{\sigma_k^2 + m_k^T \cdot m_k}$$

wobei  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T$  und  $q_n$  die  $n$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T \cdot Dd^T$  ist.

5 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 8, bei dem

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Zustandsgröße ist, die nicht über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- 10 - eine Matrix  $P$ , welche die orthogonale Projektion auf den Nullraum von  $A$  ist, bestimmt wird;
- eine zweite Messgröße ermittelt wird, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit die ausgewählte Zustandsgröße eindeutig bestimmbar ist;
- 15 - eine der zweiten Sensitivitätsgrößen die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow x_1}^2$  der ausgewählten Zustandsgröße bei Hinzunahme der ermittelten zweiten Messgröße  $x_k$  mit der Varianz  $\sigma_k$  zu dem Messpark darstellt;
- 20 - die zweite Sensitivitätsgröße durch folgende Formel bestimmt wird:

$$\sigma_{k \rightarrow x_1}^2 = \sigma_k^2 \cdot \frac{\|p\|^2}{\|p_k\|^2} + \left\| m_i - \frac{\|p\|}{\|p_k\|} m_k \right\|^2,$$

25 mit  $p = Pn_l$ , wobei  $n_l$  die  $l$ -te Spalte der Matrix  $N^T$  ist und  $m_i$  die  $i$ -te Spalte der Matrix  $M^T \cdot N^T$  ist und  $p_k$  die  $k$ -te Spalte der Matrix  $P \cdot N^T$  ist.

30 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 9, bei dem

- wenigstens einer der ausgewählten Parameter eine ausgewählte Diagnosegröße ist, die nicht über die ersten Messgrößen bestimmbar ist;
- 35 - eine Matrix  $Dd$ , welche die Jakobimatrix der Diagnosegrößen  $d_i = d_i(x)$  ist, bestimmt wird;

- eine Matrix  $P$ , welche die orthogonale Projektion auf den Nullraum von  $A$  ist, bestimmt wird;
- eine zweite Messgrößen ermittelt wird, deren Wert eine Zustandsgröße  $x_k$  ist und welche zu dem Messpark hinzuzufügen ist, damit die ausgewählte Diagnosegröße eindeutig bestimmbar ist;
- eine der zweiten Sensitivitätsgrößen die Varianz  $\sigma_{k \rightarrow d_n}^2$  der ausgewählten Diagnosegröße  $d_n$  bei Hinzunahme der ermittelten zweiten Messgröße  $x_k$  mit der Varianz  $\sigma_k^2$  zu dem Messpark darstellt;
- die zweite Sensitivitätsgröße durch folgende Formel bestimmt wird:

$$\sigma_{k \rightarrow d_n}^2 = \sigma_k^2 \cdot \frac{\|p\|^2}{\|p_k\|^2} + \left\| M^T \cdot c_n - \frac{\|p\|}{\|p_k\|} m_k \right\|^2,$$

mit  $p = P c_n$ , wobei  $c_n$  die  $n$ -te Spalte der Matrix  $N^T$ .  $D d^T$ ,  $m_k$  die  $k$ -te Spalte der Matrix  $M^T$ .  $N^T$  ist und  $p_k$  die  $k$ -te Spalte der Matrix  $P$ .  $N^T$  ist.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, bei dem in der Matrix  $P \cdot N^T$  die Spalte gesucht wird, sodass  $p$  von dieser Spalte linear abhängt, wobei der Index  $k$  dieser Spalte angibt, dass der zweite Messwert  $x_k$  zum Messpark hinzuzunehmen ist, damit der ausgewählte Parameter eindeutig bestimmbar ist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 11, bei dem die Standardabweichung  $\sigma_k$  der zweiten Messgröße 1% des Wertes der zweiten Messgröße ist.

13. Vorrichtung zur Analyse eines technischen Systems, welche derart eingerichtet ist, dass ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchführbar ist.

14. Computerprogrammprodukt, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem ein Computerprogramm gespeichert ist, das auf einem Rechner ablaufbar ist und mit dem das Ver-

fahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12 durchführbar  
ist.

Zusammenfassung

Verfahren und Vorrichtung zur Analyse eines technischen Systems sowie Computerprogramm-Produkt

5

Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Entwurf eines technischen Systems, das durch Parameter umfassend Zustandsgrößen und von den Zustandsgrößen abhängige Diagnosengrößen charakterisiert ist. Das technische System wird dabei durch ein

10

Gleichungssystem beschrieben, wobei die Zustandsgrößen die Lösungen des Gleichungssystems sind. In den Entwurf des technischen Systems wird ein Messpark einbezogen, der erste Messgrößen umfasst, wobei die ersten Messgrößen im technischen System mit einer vorgegebenen Genauigkeit gemessen werden.

15

Ferner sind in dem technischen System zweite, von den Zustandsgrößen abhängige Messgrößen mit einer vorgegebenen Genauigkeit messbar. In dem erfindungsgemäßen Verfahren werden erste Sensitivitätsgrößen für die ersten Messgrößen und/oder zweite Sensitivitätsgrößen für die zweiten Messgrößen be-

20

stimmt, wobei zur Bestimmung der ersten Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße eine Änderung der Genauigkeit der Messung der ersten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst, und zur Bestimmung der zweiten

Sensitivitätsgrößen ermittelt wird, in welchem Maße die Messung der zweiten Messgrößen wenigstens einen ausgewählten Parameter beeinflusst. Der Messpark wird daraufhin in Abhängigkeit von den ersten und/oder zweiten Sensitivitätsgrößen derart verändert, dass die Genauigkeit einer oder mehrerer erster Messgrößen verändert wird und/oder eine oder mehrere ers-

30

te Messgrößen aus dem Messpark herausgenommen werden und/oder eine oder mehrere zweite Messgrößen zum Messpark hinzugenommen werden. Dieser veränderte Messpark wird zum Entwurf des technischen Systems eingesetzt.

35   Figur 1



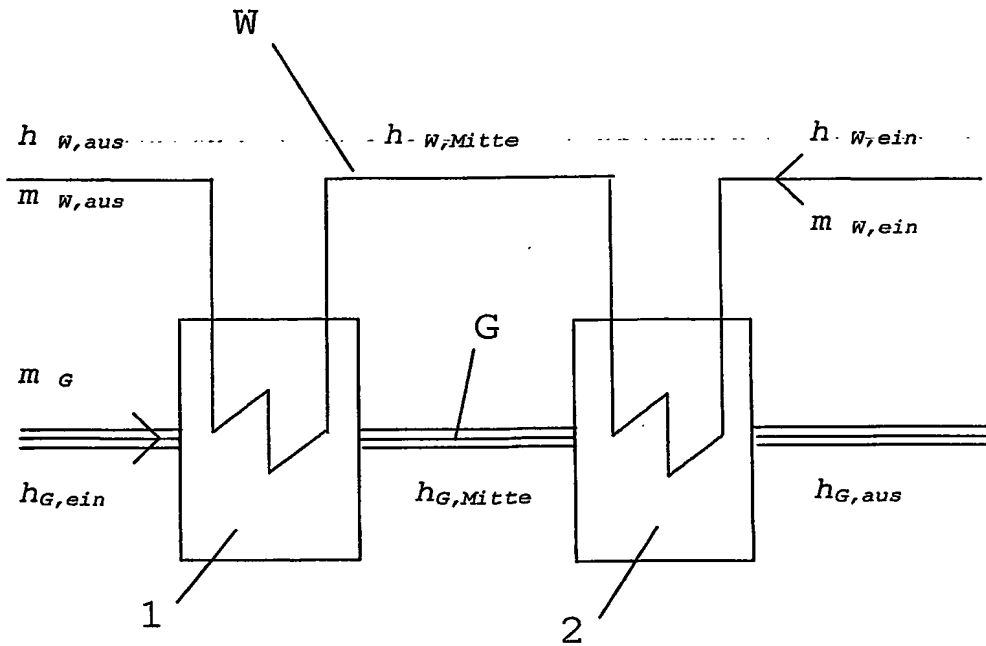
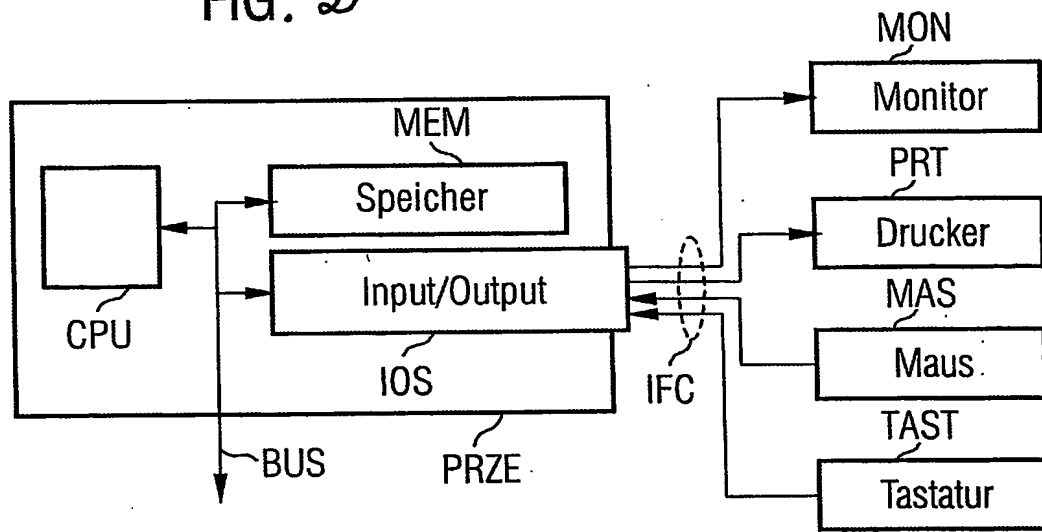


Fig. 1

FIG. 2



PCT Application  
PCT/EP2003/012754

